



TITLE:

場の理論におけるエントロピーの数値計算法の開発とそれに基づく相対論的重イオン衝突での熱化機構の解析 (Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

築地, 秀和

CITATION:

築地, 秀和. 場の理論におけるエントロピーの数値計算法の開発とそれに基づく相対論的重イオン衝突での熱化機構の解析. 京都大学, 2018, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2018-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20905>

RIGHT:

論文[8, 13, 34, 72]中の図を使用。論文[8]: F. D. Aaron et al. [H1 and ZEUS Collaborations], "Combined Measurement and QCD Analysis of the Inclusive e^+p Scattering Cross Sections at HERA," JHEP 1001, 109 (2010) DOI:10.1007/JHEP01(2010)109, 論文[13]: M. Gyulassy and L. McLerran, "New forms of QCD matter discovered at RHIC," Nucl. Phys. A 750, 30 (2005) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.10.034>, 論文[34]: S. S. Adler et al. [PHENIX Collaboration], "Elliptic flow of identified hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV," Phys. Rev. Lett. 91, 182301 (2003) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.182301>, 論文[72]: T. Epelbaum and F. Gelis, "Pressure isotropization in high energy heavy ion collisions," Phys. Rev. Lett. 111, 232301 (2013) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.232301>.

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	築地 秀和
論文題目	場の理論におけるエントロピーの数値計算法の開発と それに基づく相対論的重イオン衝突での熱化機構の解析		
(論文内容の要旨)			
本論文は、クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) 生成を目指す相対論的重イオン衝突実験の解析が示した驚くべき事実、すなわち、生成された物質が早い時間 (1fm/c 程度) で (近) 局所熱平衡に達しており、その熱化の緩和時間が量子色力学 (QCD) に基づく素朴な摂動理論では到底説明できないほど早いという「早い熱化」の問題の解決を目的としている。			
本論文では、当該の高エネルギー重イオン衝突直後はグルーオンのコヒーレントな古典場としてよく記述できるという描像を基に、半古典近似のもとで系の記述を行う。そのため位相空間上の量子力学的な分布関数であるウィグナー関数を導入する。まず、量子揺らぎの存在する重イオン衝突の初期状態をウィグナー関数により記述する。系の時間発展はウィグナー関数の発展方程式を半古典近似のもとで解くことにより求めている。半古典近似の範囲ではそれは古典方程式を解くことに帰着する。エントロピーを求めるための本論文での工夫として、ウィグナー関数を量子力学の不確定性の範囲で疎視化して得られる伏見関数を用いる。量子力学的記述と等価な記述を与えるウィグナー関数は (半) 正定値性を持たないが、伏見関数は (半) 正定値性を有する。その時間発展は時間依存のウィグナー関数を各時間で疎視化することにより求めている。半正定値の伏見関数を分布関数として用いて古典的エントロピーを定義することができる。このエントロピーはバール (Wehr1) が導入したもので、本論文では伏見-バール (H-W) エントロピーと呼んでいる。			
伏見関数を求めるための疎視化および H-W エントロピーの計算に必要な位相空間全体の多重積分を行うために、モンテカルロ法と「試験粒子法」を結びつけた 2 つの数値計算法を開発している。少数自由度の量子力学系の H-W エントロピーの計算を行い、エントロピー生成が起こることを示すとともに開発手法の有効性を確かめている。その手法をヤン・ミルズ場へ適用する場合は自由度がさらに膨大となるため、数値計算の収束をよくするために分布関数を 1 体分布関数で近似する「積近似」を提案している。量子系での試行により、積近似は H-W エントロピーを 10-20% 程度の過剰評価を与えることを確認している。また、H-W エントロピーはゲージ不変であり、積近似による破れも無視できるほど小さいことを指摘している。			
ヤン・ミルズ場のエントロピーの具体的な計算は 2 種の初期条件の場合について行っている。まず、平均値が 0 のランダムなヤン・ミルズ場の配位を初期条件とした場合に、H-W エントロピーは初期の振動的なふるまいの後、単調な増加を示し、最終的にある一定値に飽和することが示されている。長時間でのエントロピー生成率が古典ヤン・ミルズ場のダイナミクスから求めた正のリアプーノフ指数の和としてのコルモゴ			

ロフシナイ (KS) エントロピー生成率とよく一致することが示されている。次に、現実の重イオン衝突直後の状態として妥当であると考えられているグルーオン場の配位に似せた配位をつくり、そのまわりに量子揺らぎが存在する場合を初期条件とした場合の計算を行っている。この場合、H-W エントロピー生成が $1\text{fm}/c$ 程度で起こることが示されている。その生成率はKS エントロピー生成率だけでは説明できず、重イオン衝突特有の初期配位の不安定性が寄与している可能性が指摘されている。さらに、求めた分布関数を用いて圧力の等方化やエネルギー分布の緩和を解析し、エントロピーの緩和時間と同程度であることが示されている。またその緩和時間とボルツマン時間との比較や、得られたエントロピーと熱平衡状態のエントロピーとの比較を行い、広い枠組みの中で得られた結果の吟味を行っている。

(論文審査の結果の要旨)

クォーク・グルーオンプラズマ生成を目指す相対論的重イオン衝突実験の解析は、生成された物質が衝突後 $1.0\text{fm}/c$ 程度の時間で局所熱平衡状態近くに緩和することを示しているが、高エネルギーで妥当と期待される量子色力学(QCD)に基づく素朴な摂動理論により得られる緩和時間はこの何倍も大きく、その短い緩和時間成立の機構は謎であった。これまでにこの「早い熱化」の機構の原因を重イオン衝突の初期状態における古典グルーオン場の不安定性に帰するものや半古典論に基づく圧力の等方化の時間の評価による説明を目指すものなど多くの研究がなされてきたが、熱化の特徴づけとして本質的であるエントロピー生成の有無あるいはその時間発展そのものの直接計算は皆無であった。それに対して、本学位論文は半古典論に基づきヤン・ミルズ理論におけるエントロピーを初めて計算しその時間発展を明らかにし、熱平衡状態への緩和時間が確かに $1\text{fm}/c$ 程度となることを示すとともに、その熱化の機構としてヤン・ミルズ場固有のカオス性と高エネルギー重イオン衝突の初期状態特有のグルーオン配位の不安定性の両方が寄与していることを示したものであり、その独創性とその意義は明らかである。また、圧力の等方化も併せて計算して他のアプローチとの比較も行っており、この論文の位置づけは明確である。

その結果を導いた手法も独創的であることは強調に値する。高エネルギー重イオン衝突の初期状態はグルーオンが支配的になっており、そのダイナミクスは半古典論によりよく記述される。そして半古典論を記述する手段としてウィグナー関数を用いることは、一般には、周知のことであるが、ウィグナー関数は負の値を取り得るのでエントロピーの計算には不適である。これに対して本論文では、量子論の不確定性の範囲内でウィグナー関数を粗視化することで得られる(半)正定値性を有する伏見関数を用いることでその障害を突破している。伏見関数はこれまで量子カオスの問題を扱う道具として使われたことがあるが、重イオン衝突でのダイナミクスを記述するのに活用されることはほとんどなかった。

技術的には膨大な数値積分が必要とされる伏見-バーン(H-W)エントロピーの計算のためにモンテカルロ法と試験粒子法を組み合わせた有用な計算方法を開発していること、また、ゲージ理論の計算に特有のゲージ不変性についても理論的な検討を行い数値的な妥当性のチェックを行っていることも高く評価できる。

さらに得られたH-Wエントロピーが熱力学的エントロピーとほとんど一致すること、得られた緩和時間が電場のエネルギー分布から得られる緩和温度に対応するボルツマン時間とほとんど一致することなど得られた結果を広い視野で評価していることも大いに評価できる。

このように本論文は、高エネルギー重イオン衝突によるクォーク・グルーオンプラズマの物理、特に、その非平衡状態の理解において独創的且つ基本的に重要な内容を含むものである。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降